

# MEMS 加速計成爲研發業者在開發 CbM 的最佳選擇 (I)

■作者：Chris Murphy / ADI 應用工程師

## 介紹狀態監測

全球狀態監測 (Condition-based Monitoring; CbM) 市場在過去幾年出現明顯成長，且預料成長動能還會延續<sup>1</sup>。這波成長正好對應 MEMS 加速計快速發展的步伐，相關元件廣泛用在各種振動感測應用，如今已能追上一度主宰市場的壓電或 PZT 加速計。隨著重要性較低的資產對於 CbM 的需求日增，市場對無線式 CbM 系統的採納速度也持續攀升，而 MEMS 加速計在此方面則扮演關鍵角色。本文將比較 MEMS 加速計與壓電式加速計，突顯 MEMS 感測器在短暫生命週期內獲得的進展。另外我們並探討 MEMS 加速計在 CbM 應用設計上的關鍵考量因素，比較三家不同廠商的五款 MEMS 感測器。

## 振動感測的現況 — MEMS 對比壓電式

業界早在 1930 年代就開始運用振動感測器來偵測機器的健康狀況。發展至今，振動分析仍被視爲預測性維護 (PdM) 最重要的方式。壓電式加速計早已發展成振動感測器的黃金標準，用在監測最重要的資產，確保其正常且有效率地運作。直到最近，MEMS 加速計因其有限的頻寬、雜訊性能、以及 g 值範圍等因素限制了其在關鍵資產的應用能力。雖然市面上有許多高 g 值範圍的加速計 (專門設計用在汽車撞擊偵測)，然而其有限的雜訊性能與頻寬使其不適合用在狀態監測。另外市面上還有一些低

雜訊 MEMS 加速計 (專門設計用在偵測傾斜度) 其頻寬與 g 值範圍也同樣不足。

少數幾家 MEMS 元件製造商持續努力克服雜訊、頻寬、以及 g 值範圍等方面的缺陷，開發出多種中等與高效能 MEMS 加速計，其中高效能產品足以媲美壓電式加速計。MEMS 感測器採用和壓電式感測器完全不同的工作原理，從而衍生出許多關鍵差異。圖 1 顯示 MEMS 元件如何測量出最低至 dc 穩態加速度時的數據，能從極低轉速的機具量測到數據以及測量傾斜度。壓電式感測器在較高頻率下顯然能提供比 MEMS 元件更好的雜訊性能，但在較低頻率下 MEMS 感測器能提供較低的雜訊，一直延伸到 dc 範圍。能夠量測這些低頻率數據，對於風力發電機以及其他低轉速機具相當有用，包括金屬加工、紙漿 / 紙張加工、以及食品 / 飲料產業採用的機具其轉速通常低於 60 rpm (1 Hz)。

圖 1: 雜訊密度: MEMS 對比壓電式元件。

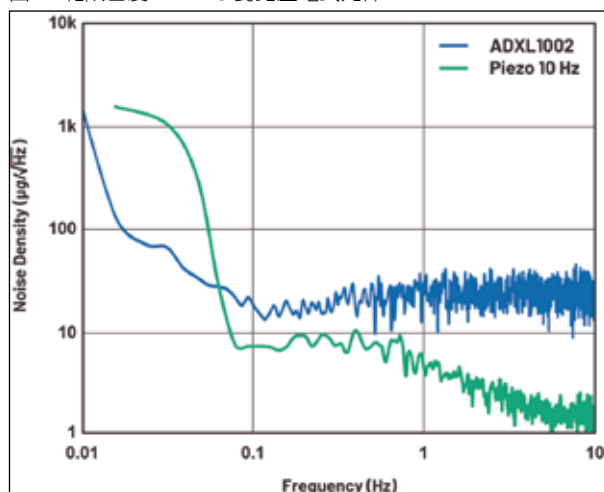
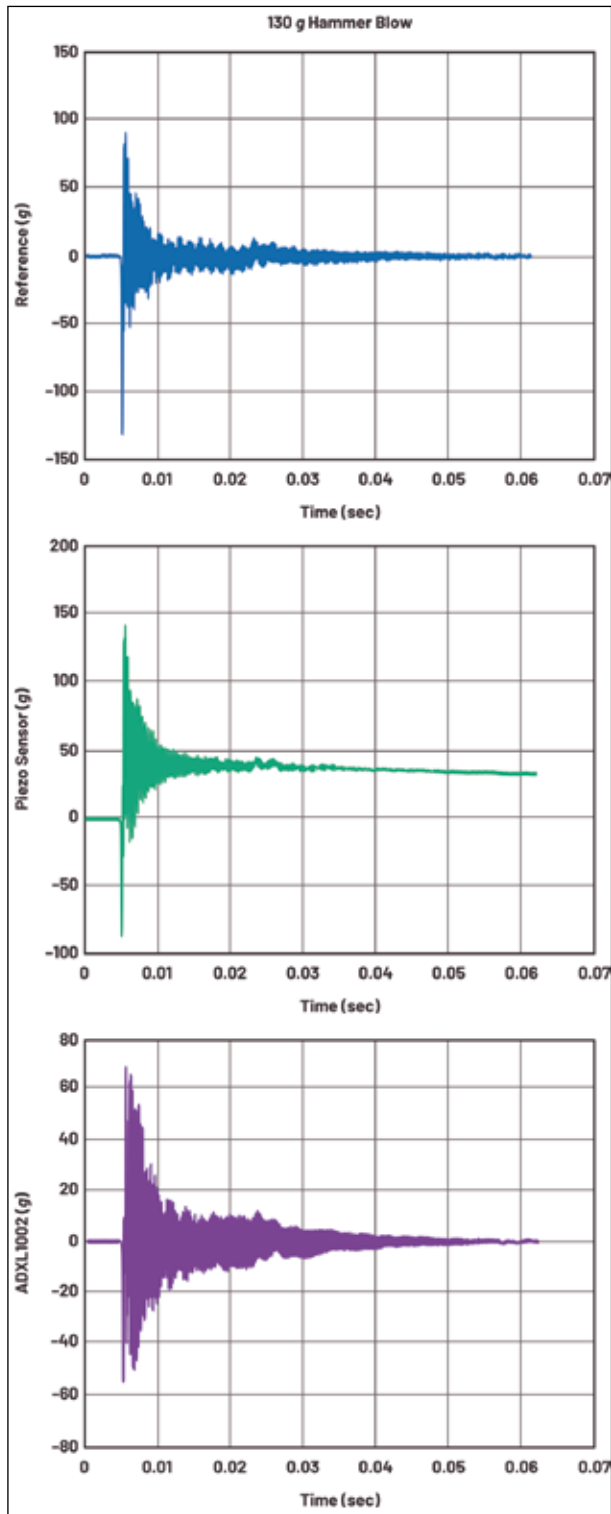


圖 2 顯示在出現大幅度振動事件時，壓電式感測器會出現飽和狀況，另外由於較大的 RC 時間常

圖 2：對過載的反應：MEMS 元件對比壓電式元件，對照參考的雷射元件



數，因此需要較長的時間才能回復到正常狀態。反觀 MEMS 元件的性能可媲美非接觸式參考感測器，幾乎瞬間就能回復到正常狀態。壓電式感測器在經歷嚴重振動事件時，可能會遇到的風險就是資產 / 流程中的寶貴資訊或失效狀況無法被偵測到，而 MEMS 感測器則能可靠地偵測到衝擊事件以及後續發生的狀況。

表 1 列出 MEMS 加速計在狀態監測應用中的一些優勢<sup>2</sup>。壓電式加速計由於尺寸、功耗、以及缺乏整合功能等因素，因此比較不適合無線 CbM 系統，但市面上仍有一些解決方案，其典型功耗範圍介於 0.2 mA 至 0.5 mA。

MEMS 加速計也具有自我測試功能，感測器能驗證功能是否 100% 正常。這對於安全關鍵環境非常有用，讓業者更容易達成系統標準的要求，可以驗證已部署的感測器功能正常。在一些應用中，這方面的功能是最重要的一項功能，因其讓維護人員絕對確認資產的當前狀態，以及量測數據的精準度與可靠度。

## MEMS 加速計在 CbM 應用中的設計考量因素

專為 CbM 應用設計的 MEMS 加速計相較於通用型加速器存在一些不同的特性。在本章節，我們將探討適合 CbM 的 MEMS 加速計的一些重要資料表參數，以及這些參數和偵測機具故障的關聯性。舉例來說，我們要如何選擇具有正確 g 值範圍或雜訊性能的感測器來偵測 300 kW 感應式馬達上的軸承失效？表 2 列出 MEMS 加速計在 CbM 應用中最重要 5 項規格。在後面的章節我們將詳細探討每項規格。

### 頻寬

振動感測器的頻寬通常和其所監視資產的重要性有直接關聯。關鍵資產或馬達對於維持流程或大型機具的營運或上線運作產生關鍵作用。如果此類資產發生故障，就會導致非預期的停機，以及潛在

表 1: 在狀態監測應用中，比較壓電式與 MEMS 加速計

感測器	千顆單位成本	雜訊	3 dB 頻寬	潛在電池壽命	DC 直流訊號響應能力	自我測試	整合功能
壓電式加速計	25 至 500 美元以上	<1 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 至 50 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	2.5 kHz 至 30 kHz+	短至中等	無	無	無
MEMS 加速計	10 至 30 美元	25 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 至 100 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	3 kHz 至 20 kHz+	中等至長	有	有	有

表 2: 比較最適合 CbM 的 MEMS 加速計

	DXL1002	ADXL317	其他 MEMS 廠商
軸數	1	3	3
$\pm 3$ dB 頻寬	11 kHz	4 kHz (x, y) 2 kHz (z)	2.9 kHz 至 8.5 kHz
共振	21 kHz	5.1 kHz (x, y) 3.1 kHz (z)	未列出或最高至 7 kHz
雜訊密度	25 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	55 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ (x, y) 120 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ (z)	75 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 至 300 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
G 值範圍	50 g	16 g	2 g 至 64 g
跨軸敏感度	1%	1%	未列出，或最高至 2%
溫度範圍	-40°C 至 +125°C	-40°C 至 +125°C	-40°C 至 +105°C
MEMS 元件連接到機具的解決方案	有	無	無

的營收損失。為了盡早偵測與診斷出故障，以及避免非規劃的停機，必須設置一個高頻寬與低雜訊的振動感測器。必須有低雜訊的性能才能在低振幅與寬頻率狀態下偵測到各種故障，因為包括軸承、齒輪啮合、以及泵浦空蝕等常見故障都發生在 — 或至少最早偵測於 — 高於 5 kHz 甚至最高至 20 kHz 以上的頻率。因此，MEMS 感測器必須能夠與工業應用幾十年來採用的振動感測器競爭：亦即壓電式加速計。雜訊值低於 100  $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$  而頻寬超過 5 kHz 的元件，在 CbM 應用中屬於高效能 MEMS 加速計。表 3 列出在 CbM 與預測性維護應用中 MEMS 加速計兩項最重要的標準<sup>3</sup>。

並非所有感測器都必須要具備超低雜訊或高頻寬；振動感測器的性能水準取決於資產維持運作的重要性有多高。核反應爐的冷卻水泵浦就屬於極度關鍵，在如此情況中就必須早期偵測出故障。表示受監測資產的重要性，直接關係到振動感測器所需

表 3: 在 CbM 應用中 MEMS 加速計的效能標準

MEMS 加速計效能	雜訊	頻寬
高	<100 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	>5 kHz
中等	>100 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 與 <1000 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	最高至 5 kHz
低	>1000 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	最高至 1 kHz

的性能等級，其性能取決於以下標準。

### 故障偵測

要能簡單偵測出振動是否超過門檻或警告值，可以使用低效能 MEMS 加速計。此種方法通常用於重要性較低的資產。

### 故障診斷

為偵測與辨識潛在的故障來源，需要用到較高等級的 MEMS 加速計搭配相關演算法

### 故障預測

此方面需要最高效能等級的 MEMS 加速計，以便盡早偵測出問題，並讓演算法能辨識出故障的成因源頭。此方面也需要掌握資產的領域知識。

### 故障預兆診斷 (Prognosis)

此種最高等級的 PdM 需要最好的 MEMS 加速計連同演算法、機器學習等技術，以及掌握對資產的對於領域知識。故障預兆診斷的目標是讓 PdM 系統提供建議，協助延長資產的壽命，甚至是協助優化資產的效能。

表 4: 在 CbM 應用中 MEMS 加速計的頻寬與共振響應

	ADXL1002	ADXL317	其他 MEMS 廠商
頻寬	11 kHz	4 kHz/2 kHz	2.9 kHz 至 8.5 kHz
共振響應	21 kHz	5.1 kHz/3.1 kHz	未列出或最高至 7 kHz

切記資產採用的預測性維護感測器，其效能等級和資產維持運作的重要性有直接關聯，而不是取決於資產本身的成本。

表 4 列出最適合 CbM 的 MEMS 加速器其可用頻寬的範圍。由於機械特性、各種移動矽元件、以及整合的調節電子元件，因此並不容易做出寬頻寬的 MEMS 加速計，尤其是低雜訊的加速計。要量測的機械共振頻率範圍通常在數 kHz。最近市面上出現多種 MEMS 加速計運用增強型濾波方法，成功將可用頻寬拉近到機械共振頻率的範圍。然而，一些製造商仍選擇不揭露其振動感測器的振動響應頻率，這反映出其要不是接近可用頻寬，不然就是此方面的數據會揭示其零件工作的敏感資訊。

### 雜訊密度

MEMS 加速計的雜訊來自幾個固有來源，包括像閃爍雜訊、布朗 (Brownian) 雜訊、或電子雜訊。通常以  $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$  表示。

表 5: 計算 MEMS 加速計雜訊時採用的濾波器階數係數

濾波器階數 (Filter Order)	係數
一階 (First)	1.57
二階 (Second)	1.11
三階 (Third)	1.05
四階 (Fourth)	1.025
磚牆	1

MEMS 加速計的雜訊輸出取決於輸出濾波器的設定，如表 5 所示。有些資料表會列出 rms 雜訊，但要注意此類資訊，因為通常是在極小頻寬測到的數據。

MEMS 加速計的輸出 rms 雜訊可根據以下公式推算：

$$\text{Output Noise rms} = \text{Noise Density} \times \sqrt{\text{Bandwidth} \times \text{Filter Order}} \quad (1)$$

瞭解感測器雜訊後，接下來的重點是針對機具種類匹配最適合的感測器，這裡須注意包括：感測器的雜訊是否會使其無法量測某些重要振動，以及感測器的 g 值範圍是否能承受潛在的故障振動幅度？幸運的是，包括 ISO 10816 這些標準能協助解決這

些問題。

ISO 10816 針對資產與機具的振動量測與評估規範了相關條件與程序。此標準定義了振動嚴重性標準，安裝機具外殼的 rms 均方根速度 (10 Hz 至 1 kHz) 用來作為狀態指示器，如表 6 所示。從機具測得的振動會根據機具尺寸、安裝策略、以及機具等級 (I = 小型, II = 中型, III = 小基座的大型, IV = 剛性基座的大型) 進行分類。

表 6: ISO 10816 振動嚴重性表

RMS 振動速度 (mm/s)	Class I	Class II	Class III	Class IV
0.28				
0.45	A	A		
0.71			A	A
1.12	B			
1.8		B		
2.8	C		B	
4.5		C		B
7.1	D		C	
11.2		D		C
18			D	
28				D
45				

■ A—最近進行的馬達安裝  
■ B—無限，滿意，長期運作  
■ C—短期運行  
■ D—造成馬達損壞的振動水平

這裡要注意加速計輸出加速度通常以 g 為單位，ISO 10816 使用的加速度單位為 mm/s 或 in/s。公式 2 協助我們把 g 轉換為 mm/s。其能推算出 10Hz 下的最小振動頻率，加速度量測的雜訊必須小於 7.18 mg 方能為 Class 2 類機具在良好範圍 (A) 偵測到振動嚴重性，根據 ISO 10816-1 ( $V_{\text{MIN}} = 1.12 \text{ mm/s}$ ) 標準，如表 6 所示<sup>4</sup>。

$$A_{\text{NOISE}} < 2\pi \times f_{\text{MIN}} \times V_{\text{MIN}} \quad (2)$$

$$A_{\text{NOISE}} = 2\pi \times 10 \text{ Hz} \times \frac{1.12 \text{ mm}}{\text{sec}} \times \frac{1 \text{ mg}}{9.8 \frac{\text{mm}}{\text{sec}^2}} < 7.18 \text{ mg}$$

公式 3 以通用格式呈現，連同一個範例，估計一個加速計在  $80 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$  雜訊密度下的總雜訊，這裡我們和一個截止頻率 1000 Hz ( $f_c = 1000 \text{ Hz}$ )

的單極低通濾波器一起使用。在 3.17 mg 加速度下，加速計符合公式 2 的邊界條件。

$$A_{NOISE} = ND \times \sqrt{[f_{NBW}]} = ND \times \sqrt{\left[\frac{\pi}{2} \times fc\right]} \tag{3}$$

$$A_{NOISE} = \frac{80 \mu g}{\sqrt{Hz}} \times \sqrt{\left[\frac{\pi}{2} \times 1000\right]} = 3.17 \text{ mg}$$

表 7 顯示每種類型機具從已知良好狀態到危險故障水準的振動限值 (prescribed vibration level)，以及對應的最低雜訊，MEMS 加速計在 region A 必須偵測的正常運行條件的振動水平 (Class I 為 4.5 mg，Class II 為 7.2 mg，Class III 為 11.5 mg，Class IV 為 17.9 mg)。

這裡的資料反映了 MEMS C2、MEMS C1、MEMS B、以及 ADXL317 (z 軸) 不適合用在感測器必須偵測正常運作狀態振動水準 (A) 下雜訊低於 0.71 mm/s 或 4.5 mg 的機具。MEMS B、MEMS C2、以及 MEMS C1 不適合用在要求雜訊低於 1.12 mms/s 或 7.2 mg 的機具。MEMS C2 的雜訊效能不足以用在任何類型的機具能夠偵測到正常運作狀態的振動水準 (A)。

請注意，表 7 列出的所有感測器雜訊值都是全頻寬量測數據，雖然 ISO 10816 只規範最高到 1 kHz 的頻寬。如果振動感測器頻寬較寬，那麼使用時不僅要偵測振動嚴重性，還要診斷更高頻率下的任何潛在故障。頻寬限制在 1 kHz 下，MEMS C1

未達 Class I 雜訊水準規範，而 MEMS C2 則僅通過 Class IV 的規範。

參考：

- 1 “Motor Monitoring Market by Offering (Hardware, Software), Monitoring Process (Online, Portable), Deployment, Industry (Oil and Gas, Power Generation, Metals and Mining, Water and Wastewater, Automotive), and Region—Global Forecast to 2023.” Research and Markets, February 2019.
- 2 Chris Murphy. “Choosing the Most Suitable Predictive Maintenance Sensor.” Analog Devices, Inc., June 2020.
- 3 Pete Sopcik and Dara O’Sullivan. “How Sensor Performance Enables ConditionBased Monitoring Solutions.” Analog Dialogue, Vol. 53, No. 2. June 2019.
- 4 Mark Looney. “MEMS Vibration Sensing: Velocity to Acceleration.” Analog Devices, Inc., March 2017. 

表 7: 根據 ISO 10816 振動嚴重性標準，MEMS 加速計在 CbM 狀態監測的雜訊比較

	雜訊密度 (µg)	頻寬 (Hz)	感測器雜訊 (mg)	要求的最低雜訊			
				Class I 0.71 mm/s 4.5 mg	Class II 1.12 mm/s 7.2 mg	Class III 1.8 mm/s 11.5 mg	Class IV 2.8 mm/s 17.9 mg
ADXL1002	25	10,000	3.1	通過	通過	通過	通過
ADXL317 [X, Y]	55	4000	4.4	通過	通過	通過	通過
ADXL317 [Z]	120	2000	6.7	失敗	通過	通過	通過
MEMS B [X, Y]	75	6300	7.5	失敗	失敗	通過	通過
MEMS B [Z]	110	6300	10.9	失敗	失敗	通過	通過
MEMS C1 [X, Y]	130	4200	10.6	失敗	失敗	通過	通過
MEMS C1 [Z]	130	2900	8.8	失敗	失敗	通過	通過
MEMS C2 [X]	300	8200	34.0	失敗	失敗	失敗	失敗
MEMS C2 [Y]	300	8500	34.7	失敗	失敗	失敗	失敗
MEMS C2 [Z]	300	5600	28.1	失敗	失敗	失敗	失敗